LTspice の使い方(上級)

【目的】

電子回路シミュレータLTspice(無償・素子数制限なし)の使い方を習得する。

【インストール】

インターネットで "LTpice" で検索または、下記リニアテクノロジーホームページから ダウンロード! LTspice XVII を 選択する。

URL→ https://www.analog.com/jp/design-center/design-tools-and-calculators/ltspicesimulator.html



【例題1】次の直列共振回路のSパラメータ特性を解析する[1]。

 $V_l=1 V$, $R_{ser}=50\Omega$, $R_l=55\Omega$, $L_l=15$ nH, $C_l=20$ pF, $R_{out}=1e-26$ とする。(必要に応じてこれらの値を変える)

ITspice XVII - [S11-S21_series_resonant.asc]				– 🗆 ×
File Edit Hjerarchy View Simulate Tools Wind	w Help			_ 8 ×
<u>⊿</u> ≊∎¶*1≯ @ € < < <	≪ ≌⊒ ⊟"			ŋく≑3本1
.				
		\sim		
· · ·/ · \ · / · \ ·	(+ () _ ()			
	15n			· · · · ·
		La a a a ∠	ъртата"	<u>i</u> na je Le
			.	Rout 🦯
$ \gamma + \gamma = $				
			1	e-26 🦯 🗧
1] .
				· · · · ·
Rser=50				· · · · · · · ·
.ac lin 100 0.1G	1G			
not I/Pout) 1/1				

(電源の設定)

AC Amplitude $\rightarrow 1$ を入力(下図)、Parasitic Properties \rightarrow Series Resistance [Ω] を 50 にする。これで 内部抵抗 50 Ω かつ振幅 1 V の電源を設定したことになる。

Functions	DC Value
() (none)	DC value:
PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Noycles)	Make this information visible on schematic: 📈
○ SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Noycles)	
◯EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)	Small signal AC analysis(AC)
◯ SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)	AC Amplitude: 1
○ PWL(t1 v1 t2 v2)	AC Phase:
O PWL FILE: Browse	Make this information visible on schematic: 🔽
0	Parasitic Properties
	Series Resistance[Ω]: 50
	Parallel Capacitance[F]:
	Make this information visible on schematic: 🗹
Additional PWL Points	
Make this information visible on schematic:	One and OK

(周波数特性の設定)

Simulate → Run を選択する。Edit Simulation Command が表示されるので、

Type of sweep: Linear,

Number of points: 100,

Start frequency: 0.1G,

Stop frequency:1G

を入力する。入力が終わると、下の空欄に .ac lin 100 0.1 G 1 G が自動的にテキスト入力される。これはスタート周波数 0.1 GHz からストップ周波数 1 GHz までを線形スイープで 100 ポイント計算をすることを意味する。

Edit Simulation Com	imand			\times				
Transient AC Analysis	DC sweep Noise	DC Transfer	DC op pnt					
Compute the small signs	al AC behavior of the c point.	ircuit linearized	about its DC operating	:				
	Type of sweep:	Linear	~					
	Number of points:	100						
	Start frequency:	0.1 G						
	Stop frequency:	1 G						
Syntax .ac <oct, dec,="" lin=""> <npoints> <startfreq> <endfreq></endfreq></startfreq></npoints></oct,>								
ac lin 100 0.1 G 1 G								
Ca	ncel	0	К					

(Sパラメータの設定)

Edit \rightarrow SPICE directive を選択する。Edit Text on the Schematic: が表示されるので、空欄に

.net I(Rout) V1

と入力する。これは.net コマンド(回路ネットワーク解析コマンドのこと)で出力抵抗 Rout の電流 I(出力電流)と電圧 V1(入 力電圧)の間の 2 端子対パラメータ(**Z**, Y, H, S)を計算するためのオプションコマンドを示す。つまり、入力ポートが電圧源 V1 で、出力ポートが Rout の二端子対回路を意味する。

I Edit Text on the Schematic	tic:		×
How to netlist this text Comment SPICE directive	Justification	Font Size	OK Cancel
net I(Rout) VI			\sim
Type Ctrl–M to start a new line.			

(Sパラメータの出力)

グラフ上で右クリックして Add Traces を選択する。Add Traces to Plot: が表示されるので、

S11(v1)

S21(v1)

を選択する。.net コマンドを追加するだけで、S パラメータ以外の回路ネットワークパラメータである H 行列、Y 行列、Z 行列、入力インピーダンス Zin、出力インピーダンス Zout も計算表示してくれる。ただし、.net コマンドを使わずに、回路の V-I 値から S パラメータを導出することも可能である。

		Only list traces matching	ОК
Available (data:	Asterisks match colons	Cancel
V(n001)	S21(v1)		
V(nOO2)	S22(v1)		
V(n003)	M1(M)		
V(n004)	Y12(v1)		
H11(M)	Y21(v1)		
H12(v1)	Y22(v1)		
$H_{21}(M)$	Yin(v1)		
H22(VI)	YOUT(VI)		
	ZII(VI) 710640		
1(E1) 1(E1)	212(01)		
l(Rout)	221(01)		
INA)	Zin()(1)		
S11(4)	Zout(v/)		
	frequency		



【例題2】次の6段ステップドインピーダンスLPFのSパラメータ特性を解析する。

V₁=1 V, R_{ser=}50, T₁: T_d=13.2p, Z₀=20, T₂: T_d=37.5p, Z₀=120, T₃: T_d=49.2p, Z₀=20, T₄: T_d=51.2p, Z₀=120, T5: T_d=36p, Z₀=20, T₆: T_d=13.7p, Z₀=120, R_{out}=50 とする。(必要に応じてこれらの値を変える。D. M. Pozar, Microwave Engineering 3rd ed., pp. 414-416, Wiley, 2005)



(電源の設定)

AC Amplitude $\rightarrow 1$ を入力、Parasitic Properties \rightarrow Series Resistance [Ω] を 50 にする。これで内部抵抗 50 Ω かつ振幅 1 V の電源を設定したことになる。(例題 1 と同じ)

(周波数特性の設定)

Simulate → Run を選択する。Edit Simulation Command が表示されるので、

Type of weep: Linear,

Number of points: 1000,

Start frequency: 0.1G,

Stop frequency: 5G

を入力する。入力が終わると、下の空欄に .ac lin 1000 0.1 G 5 G が自動的にテキスト入力される。これはスタート周波数 0.1 GHz からストップ周波数 5 GHz までを線形スイープで 1000 ポイント計算をすることを意味する。(Number of points と Stop frequency 以外は例題 1 と同じ)

(Sパラメータの設定)

Edit → SPICE directive を選択する。Edit Text on the Schematic: が表示されるので、空欄に .net I(Rout) V1

と入力する。これは.net コマンド(回路ネットワーク解析コマンドのこと)で出力抵抗 Rout の電流(出力電流)と電圧 V1(入 力電圧)の間の 2 端子対パラメータ(Z, Y, H, S)を計算するためのオプションコマンドを示す。つまり、入力ポートが電圧源 V1 で、出力ポートが Rout の二端子対回路を意味する。(例題 1 と同じ)

(伝送線路の設定)

Edit → Component → tline を選択する(損失を考慮した伝送線路の場合は ltline を選択する。)。配置したら、遅延時間 Td と特性インピーダンス Z0 に設計値を入力する。遅延時間は基板の実効誘電率を ε_{eff} 、物理長を l [m]すると 次式となる。

$$T_d = \frac{l}{v_c} = \frac{l\sqrt{\varepsilon_{eff}}}{c}$$

🗸 Select Con	nponent Symbol	×
Top Director	y. C:¥Users¥kusama¥Do	ouments¥LTspiceXVII¥lib¥sym 🗸
R	Ð	Ideal Lossless Transmission Line
C:¥Users¥	kusama¥Documents¥LTsr	Open this macromodel's test fixture
load2 Ipnp Itline mesfet nmos nmos4 npn npn2 npn3	npn4 pif pmos pmos4 pnp pnp2 pnp4 polcap res res2	schottky SO Atherm-HeatSink SO Atherm-NMOS SO Atherm-PCB sw tline TVSdiode varactor voltage zener
<	Cancel	≥



【エクセル出力】計算結果をテキスト出力してエクセルで描画する。

(テキストデータ出力)

計算結果のグラフを選択した状態で、File → Export data as text を選択する。

ITspice XVII - S11-S21_SI-LPF.raw <u>File View Plot Settings</u> Simulation Tools Window Help Mew Schematic Ctrl+N 🔍 🔍 🎗 🔛 🔛 🚍 🖻 Dpen... Ctrl+O Save Plot Settings Ctrl+S Save Plot Settings As S11(v1) Close 🛃 Print... Ctrl+P Print Preview Print Setup... Print Monochrome Export data as text Execute .MEAS Script Convert to Fast Access S11-S21_SI-LPE.asc S11-S21_SI-LPF.asc 1.1GHz 1.6GHz S11-S21_series_resonant.asc

(出力先と出力フォーマットの選択)

Select Traces to Export が表示されるので、テキスト出力させたいデータを選択する。 出力ファイルの保存先とフォーマットは以下のように指定できる。

File: ***.txt (保存先を指定しなければ、LTspiceの回路図面ファイル.raw が置いてあるフォルダと同じ場所) Format: (dB,deg) または re,im

OKを押すとテキストファイル(.txt)が出力される。

					ddy+01	a a y_nei a + in	10100
Select W	/ave forms	s to Expor	t			Brows	e
Otrl-Olic	k to toggi	le		Format:	Polar:	(dB,deg)	~
V(n001)	la(T1)	Ic(T2)	S21(v1) Z	out(v1)	Polar:	(dB,deg)	
V(nOO2)	la(T2)	lo(T3)	S22(M)		Cartes	sian: re,im	
V(nOO3)	la(T3)	lc(T4)	M1(M)				
V(n004)	la(T4)	lc(T5)	Y12(v1)				
V(n005)	la(T5)	Ic(T6)	Y21(v1)				
V(n006)	la(T6)	Id(T1)	Y22(v1)				
V(n007)	Ib(T1.)	Id(T2)	Yin(v1)				
H11(M)	Ib(T2)	Id(T3)	Yout(v1)				
H12(v1)	Ib(T3)	Id(T4)	Z11(v1)				
H21 (v1.)	1b(T4)	Id(T5)	Z12(v1)				
H22(MI)	Ib(T5)	Id(T6)	Z21(v1)				
- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			200641				
H11(M) H12(M) H21(M) H22(M)	Ib(T2) Ib(T3) Ib(T4) Ib(T5)	Id(T3) Id(T4) Id(T5) Id(T6)	Yout(v1) Z11(v1) Z12(v1) Z21(v1) Z21(v1)				

下の例は出力フォーマットを(dB,deg)で選択した場合を示している。5 つのデータは左から、周波数、S11(振幅、位相角度)、S21(振幅、位相角度)の順に並んでいる。

□ TL120-20.txt - メモ帳			- 0	×
ファイル(E) 編集(E) 書式(Q) 表示(V) ヘルプ(H)				
Freq. \$11(v1) \$21(v1) 1.000000000000000000000000000000000000	(-5.32998163952134e -5.85887316998846e (-6.41176120809577e -6.98846199024978e (-7.58878382429776e -8.21252718884559e -9.52944123228536e (-1.0221738631902e -1.02374524915749e -1.16750388488502e (-1.24346876219005e (-1.32161459636819e (-1.32161459636819e (-1.48434436817822e -1.48434436817822e -1.5688741203374e (-1.65547648015216e (-1.4412259186611e) 1.0412030000000000000000000000000000000000	-006dB, 1.696704443030 -006dB, 1.6891636421141 -006dB, 1.686568187374 -006dB, 1.686568187374 -006dB, 1.671362114960 -006dB, 1.666292933785 -006dB, 1.666292933785 -006dB, 1.6661223490728 -005dB, 1.656153775758 -005dB, 1.661083778826 -005dB, 1.64601348873 -005dB, 1.64601348873 -005dB, 1.64601348873 -005dB, 1.64601348873 -005dB, 1.64601348873 -005dB, 1.646013478292 -005dB, 1.635871995601 -005dB, 1.625729212190 -005dB, 1.62567311759 -005dB, 1.615585018655 -005dB, 1.615585018655	15e+002- 13e+002- 88e+002- 88e+002- 83e+002- 94e+002- 94e+002- 35e+002- 45e+002- 45e+002- 14e+002- 73e+002- 73e+002- 68e+002- 72e+00	~
	1行、1列	100% Windows (CRLF)	ANSI	

このファイルを Excel で開くときは、ファイル→開く→参照→ファイル名の種類→すべてのファイル(*,*)を選択→カンマやタ ブなどの区切り文字によってフィールドごとに区切られたデータを選択→次へ→区切り文字でカンマにチェック→次へ

テキスト ファイル ウィザード - 1 / 3	?	×	〒キストファイルウイザード-2/3 ? ×
 選択したデータは区切り文字で区切られています。 [次へ]をか少かするか、区切るデータの形式を指定してください。 元のデータの形式 データのファイル形式を選択してください: かンマやダブなどの区切り文字によってフィールドごとに区切られたデータ(D) へスペースによって右または左に揃えられた固定長フィールドのデータ(W) 取り込み開始行(<u>R</u>): 1 ・		~	フィールドの区切り文字を指定してください。[データのブレビュー] ボックスには区切り位置が表示されます。 区切り文字 図 タブ(I) セミコロン(M) ブ ホンマ(C) スペース(S) こその他(Q):
□ 先頭行をテータの見出しとして使用する(M) ファイリ、C-Y IsersYkusamaYDronbovYkusamaYStuduX1 PublicationYS 論文辞¥ XTI 120-20 tvt	- መግ ሥ	1-	データのプレビュー(<u>P</u>)
IP CF-052-1024 IP CF-052-1024 IP CF-052-1024 IF req. S11(v1) S21(v1) S21(v1) S21(v1) S21(v1) J1.00000000000-000-0008 (-5.91105886485286e+001dB,-1.00343436671348e+002-) (-5.229816395) J1.0390939393910=+008 (-5.3810426848549e+001dB,-1.0138680720831e+002-) (-6.4292323172) J1.138181818020-0068(-5.78614404287391e+001dB,-1.038437806120881e+002-) (-7.61878654331) J1.23723723723730e+008 (-5.88840287543317e+001dB,-1.03418824073867e+002-) (-8.89884372761)	2134e-00 7169e-00 8889e-00 0008e-00	- 6c 6c 6c 6c 8c	Freq. \$11(v1) \$21(v1) (-5.2298)163352134e-006dB 1.000000000000000000000000000000000000
キャンセル < 戻ぶ(B) 次へ(N) >	完了	"(<u>E</u>)	キャンセル < 戻る(<u>B</u>) 次へ(<u>N</u>) > 売了(<u>E</u>)

ただし、このままでは(、dB、−)など数値データではない記号が混入しており、Excelが数値データとして認識できないため、 次のように不要な記号を消去する必要がある。ホーム→検索と選択をクリック→置換→①検索する文字列に(を入力して

置換後の文字列を空白→すべて置換、②検索する文字列に dB を入力して置換後の文字列を空白→すべて置換、③検索 する文字列に -)を入力して置換後の文字列を空白→すべて置換、することでエクセルデータとしてグラフ描画できる。

ידר	イルホーム	▲ 挿入 ページレ	/イアウト 数式	データ	校閲	表示	開発	♀実	行したい作業を入力して	てください			サインイン
貼り	■ み □ □ - □ 付け ▼ ダ □	ġji>yh B I <u>U</u> • │ ∰ • │	• 11 • A · .	• ≡ ≡	= [≫] * ≡		₩¥	• %°	記録を作付き書式 ▼ 「「「」」 「「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」	【設定▼ 】	計挿入 ▼ ■ ■ 書式▼	∑ - A ↓ Z ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	▼
クリッ	プボード ら	フォント		Gi i	配置	G.	数	値 G	スタイル		セル	1	編集
A1	. .	: × ✓ j	Freq.										
	А	В			С				D			E	
1	Freq.	S11(v1)		S21(v1)									
2	1.00E+08	(-5.911058864852	86e+001dB	-1.00343	43667134	8e+002	-)	(-5.329	98163952134e-0	06dB	1.696704	4430301	5e+002-)
3	1.10E+08	(-5.830026884684	19e+001dB	-1.01368	60720633	1e+002	-)	(-6.423	29321727169e-0	06dB	1.686464	7517558	5e+002-)
4	1.20E+08	(-5.756184046379	91e+001dB	-1.02393	77620068	1e+002	-)	(-7.613	78564038889e-0	06dB	1.676224	1540067	3e+002-)
5	1.30E+08	(-5.688402375433	17e+001dB	-1.03418	92407336	7e+002	-)	(-8.899	84372760008e-0	06dB	1.665982	5673482	3e+002-)
6	1.40E+08	(-5.625803451006	36e+001dB	-1.04444	02609198	8e+002	-)	(-1.027	97221087536e-0	05dB	1.655739	9091627	2e+002-)
7	1.50E+08	(-5.567689839957	53e+001dB	-1.05469	05189698	3e+002	-)	(-1.175	15474685257e-0	05dB	1.645496	0966338	9e+002-)
8	1.59E+08	(-5.513498574846	61e+001dB	-1.06493	96501298	9e+002	-)	(-1.331	33209627267e-0	05dB	1.635251	0467310	9e+002-)
9	1.69E+08	(-5.462768682765	39e+001dB	-1.07518	72234690	5e+002	-)	(-1.496	29207850298e-0	05dB	1.625004	6761935	2e+002-)
10	1.79E+08	(-5.415117961362	53e+001dB	-1.08543	27367123	7e+002	-)	(-1.669	81048995532e-0	05dB	1.614756	9015142	6e+002-)
11	1.89E+08	(-5.370226011527	84e+001dB	-1.09567	56109166	8e+002	-)	(-1.851	65138959013e-0	05dB	1.604507	6389242	3e+002-)

一方、下の例は出力フォーマットを re,im で選択した場合を示す。5 つのデータは左から、周波数、S11 実部, S11 虚部, S21 実部, S21 虚部の順に並んでいる。

			- 0	×
ファイル(E) 編集(E) 書式(Q) 表示(V) ヘルプ(H)				
Freq. \$11(v1) \$21(v1) 1.000000000000000000000000000000000000	-9.83052800944 -9.81354323131 -9.79575467145 -9.77716364096 -9.75777151035 -9.73757970941 -9.71658972719 -9.69480311190 -9.67222147083 -9.64884647029 -9.62467983547 -9.59972335043 -9.57397885795 -9.54744825947 -9.52013351497 -9.49203664287 -9.49203664287 -9.46315971996 -9.43350488125	483e-001,1.8331403156 554e-001,1.9219835918 239e-001,2.0106734354 703e-001,2.0992027474 264e-001,2.1875644388 434e-001,2.2757514314 657e-001,2.3637566580 739e-001,2.4515730632 985e-001,2.6266112476 309e-001,2.6266112476 309e-001,2.8008097900 886e-001,2.8875766924 891e-001,2.8741127088 543e-001,3.1464642520 759e-001,3.1464642520 929e-001,3.3178089104	5484e-001 1704e-001 15999e-001 13909e-001 13575e-001 15962e-001 6187e-001 13747e-001 139706e-001 13657e-001 13657e-001 13657e-001 13815e-001 13815e-001 13805e-001	~
	1行、1列	100% Windows (CRLF)	UTF-8	

このファイルを Excel で開くときは、ファイル→開く→参照→ファイル名の種類→すべてのファイル(*,*)を選択→カンマやタ ブなどの区切り文字によってフィールドごとに区切られたデータを選択→次へ→区切り文字でカンマにチェック→次へ、でエ クセル数値データとして読み込める。ただし、大きさと位相角度を表示するには以下の計算が必要である。

$$|S_{11}| = \sqrt{\operatorname{Re}[S_{11}]^2 + \operatorname{Im}[S_{11}]^2},$$

$$|S_{11}|[dB] = 20 \log_{10} |S_{11}|$$

$$\angle S_{11} = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}[S_{11}]}{\operatorname{Re}[S_{11}]} = \operatorname{atan2}(\operatorname{Re}[S_{21}], \operatorname{Im}[S_{21}])$$

$$|S_{21}| = \sqrt{\operatorname{Re}[S_{21}]^2 + \operatorname{Im}[S_{21}]^2},$$

$$|S_{21}|[dB] = 20\log_{10}|S_{21}|$$

$$\angle S_{21} = \tan^{-1}\frac{\operatorname{Im}[S_{21}]}{\operatorname{Re}[S_{21}]} = \operatorname{atan2}(\operatorname{Re}[S_{21}], \operatorname{Im}[S_{21}])$$

詳しい使い方を知りたいときは参考文献を見て下さい。

【参考文献】

- [1] Manou Ghanevati "Fundamentals of RF and Microwave Circuit Design 2nd ed." pp.45-47
- [2] https://wireless-square.com/2016/11/01/s-parameters-with-ltspice/
- [3] 富井里一, ziVNAu を製作するに至った動機, RF ワールド No.35, pp. 12-19.
- [4] 市川,高周波回路設計のためのSパラメータ詳解,CQ出版社

[5] 草間裕介, 小松直樹, 関洋平, 藤田春輝, ``ステップドインピーダンスローパスフィルタの設計と製作に関する

一検討,"電子情報通信学会技術研究報告, vol. 119, no. 37, MW2019-12, pp. 13-18 (2019.5)